

# Influência Da Estabilização De Um Solo Argiloso Com Escória De Aciaria Elétrica Primária Na Deformação Permanente

Bruna Martins de Melo

Graduanda em Engenharia Civil, UFV, Viçosa, Brasil, bruna.m.melo@ufv.br

Klaus Henrique de Paula Rodrigues

Professor, UFV, Viçosa, Brasil, klaushenrique@hotmail.com

Taciano Oliveira da Silva

Professor, UFV, Viçosa, Brasil, taciano.silva@ufv.br

Heraldo Nunes Pitanga

Professor, UFV, Viçosa, Brasil, heraldo.pitanga@ufv.br

Juliana Rodrigues Silva

Graduanda em Engenharia Civil, UFV, Viçosa, Brasil, juliana.r.silva@ufv.br

**RESUMO:** O presente trabalho investigou a influência da estabilização de um solo argiloso com escória de aciaria elétrica primária (EAEP) no que tange a redução de deformações permanentes no subleito; além de verificar a aplicabilidade da teoria de *Shakedown*. A dosagem ótima foi obtida através da função desejabilidade no software Minitab 18, a qual foi composta por 80% de solo e 20% de EAEP. Corpos de prova compactados na energia Proctor normal foram confeccionados no teor de umidade ótimo e submetidos a cura selada em câmara úmida por 28 e 56 dias. Procedeu-se à realização dos testes triaxiais de cargas repetidas para a avaliação dos resultados de deformação permanente. Observou-se que a estabilização do solo argiloso com EAEP reduziu o acúmulo de deformação permanente. No entanto, o prolongamento do tempo de cura para as misturas analisadas não se mostrou significativo nesse aspecto. Além disso, para as misturas estabilizadas notou-se que a maioria dos corpos de prova atingem o *Shakedown*.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilização de solos. Escória de aciaria elétrica primária. Deformação permanente. Teoria de *Shakedown*.

**ABSTRACT:** The present study investigated the influence of stabilizing a clayey soil with electric arc furnace slag (EAFS) in terms of reducing permanent strains in the subgrade; as well as verifying the applicability of the *Shakedown* theory. The optimal dosage was obtained through desirability function in the Minitab 18 software, which consisted of 80% soil and 20% EAFS. Specimens compacted at standard Proctor energy with optimum moisture content were prepared and subjected to sealed curing in a moist chamber for 28 and 56 days. Triaxial repeated load tests were conducted to evaluate the results of permanent strain. It was observed that stabilizing the clay soil with EAFS reduced the accumulation of permanent deformation. However, the prolonged curing time for the analyzed mixtures was not significant in this aspect. Furthermore, for the stabilized mixtures, it was noted that most specimens reached *Shakedown*.

**KEYWORDS:** Soil stabilization. Electric arc furnace slag. Permanent deformation. *Shakedown* theory.

## 1 INTRODUÇÃO

Historicamente, o Brasil é um país que prioriza o modal rodoviário por meio de suas políticas de investimento em transporte. Atualmente, segundo dados da CNT (2022), o modal rodoviário é responsável por aproximadamente 65,0% de todo o transporte de cargas e por 95,0% do total de passageiros transportados no país. Considerando a pesquisa sobre rodovias da CNT (2022), verificou-se que somente 12,4% da extensão total das rodovias brasileiras são pavimentadas, ao passo que 78,5%, ou seja, cerca de 1,4 milhão de

quilômetros da malha rodoviária são não pavimentadas, o que afeta negativamente as condições de segurança e conforto dos usuários. Ainda segundo a CNT (2022) conclui-se que 61.311 quilômetros, ou seja, 55,5% da extensão total das rodovias pavimentadas, apresentam algum tipo de problema, seja no pavimento, na sinalização ou na geometria da via. Considerando esses três aspectos de forma conjunta, 31,1% encontram-se em estado regular, 18,6% em estado ruim e 5,8% em estado péssimo.

Dentre as patologias citadas na pesquisa rodoviária da CNT (2022) destacam-se o desgaste do pavimento, o trincamento por fadiga e os afundamentos por trilha de rodas. A capacidade de suporte do solo de subleito tem uma influência direta na condição estrutural de um pavimento, podendo ser um fator contribuinte para o afundamento nas trilhas de rodas (Huang, 2004). Melhorar as propriedades de engenharia do solo do subleito pode prolongar consideravelmente a vida útil de uma rodovia. A fim de melhorar o desempenho e garantir a segurança e estabilidade das estradas, pesquisas têm sido feitas para analisar a melhoria dos parâmetros de resistência de solos estabilizados utilizando materiais com propriedades aglomerantes como cal, cinza volante energética, cinza volante biológica, escória de aciaria, cimento (Lindh; Lemenkova, 2023), entre outros.

Nesse contexto de emprego de resíduos como agentes estabilizadores de solo, uma opção de material de baixo custo para uso em pavimentação que vem ganhando destaque são as escórias de aciaria, que são subprodutos da indústria siderúrgica gerados durante a produção de aço a partir da sucata (Terrones-Saeta et al., 2021). Wang et al. (2020) avaliaram misturas entre solo e escória de aciaria elétrica e mostraram que o aumento do teor de escória aumentou os valores de resistência à compressão não confinada e de índice CBR.

Deformações resilientes e permanentes, analisadas comumente sob carregamentos cíclicos, são a resposta geral do material de subleito, frequentemente avaliadas conforme a Teoria de *Shakedown*. Segundo essa teoria, o comportamento de um material pode ser categorizado em três grupos: *Shakedown* plástico, fluência plástica e colapso incremental (Wang; Zhuang, 2021). Estudos têm sido realizados com o propósito de avaliar a aplicabilidade da Teoria de *Shakedown* em materiais reciclados, atuando como materiais das camadas estruturais de um pavimento, submetidos a carregamentos cíclicos.

Posto isso, a proposta da presente pesquisa foi avaliar a utilização da escória de aciaria elétrica primária na estabilização de um solo argiloso, e verificar a aplicabilidade da Teoria de *Shakedown*.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

#### 2.1.1 Amostra de Solo Argiloso

Para a realização dos ensaios foi utilizada uma amostra de solo residual proveniente de jazidas de empréstimo localizadas no município de Viçosa, estado de Minas Gerais, Brasil. A preparação dessa amostra para os ensaios geotécnicos de laboratório foi realizada conforme a norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2016a).

Os ensaios realizados para fins de caracterização geotécnica das amostras de solos foram: i. Granulometria conjunta, conforme a norma técnica NBR 7181 (ABNT, 2018); ii. Limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), conforme as normas técnicas NBR 6459 (ABNT, 2017a) e NBR 7180 (ABNT, 2016b), respectivamente; iii. Massa específica dos grãos do solo, conforme a norma técnica NBR 6458 (ABNT, 2017b); iv. Compactação na energia do Proctor Normal, conforme a norma técnica NBR 7182 (ABNT, 2020), para fins de determinação do peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dm\acute{a}x}$ ) e do teor de umidade ótimo ( $w_{ot}$ ) dos solos compactados. Os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização e classificação geotécnica da amostra de solo analisada.

| Parâmetro                                | Resultado  |
|--|------------|
| % argila ( $\phi < 0,002$ mm)            | 61         |
| % silte ( $0,002$ mm $< \phi < 0,06$ mm) | 14         |
| % areia ( $0,06$ mm $< \phi < 2$ mm)     | 25         |
| % pedregulho ( $2$ mm $< \phi < 60$ mm)  | 0          |
| LL (%)                                   | 78         |
| LP (%)                                   | 43         |
| IP (%)                                   | 35         |
| $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )            | 2,869      |
| $\gamma_{d,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )    | 13,95      |
| $w_{ot}$ (%)                             | 31,0       |
| TRB                                      | A-7-5 (20) |
| USC                                      | MH         |
| MCT                                      | LG'        |

### 2.1.2 Amostra de EAEP

Para esta pesquisa foram coletadas amostras de escória de aciaria elétrica primária (EAEP) fornecidas por uma empresa que atua no setor de fabricação de tubos metálicos, localizada na região do Alto Paraopeba, estado de Minas Gerais, Brasil. Na sequência, as amostras foram moídas em equipamento de abrasão Los Angeles para redução da sua granulometria em partículas de diâmetros menores que 0,6 mm (peneira #30). Para proceder a redução das amostras de EAEP utilizou-se o procedimento PRO 199 (DNER, 1996b), e a preparação para a realização de ensaios de laboratório conforme a norma técnica NBR 6457 (ABNT, 2016a).

Os ensaios de caracterização física da amostra de EAEP moída foram realizados seguindo as metodologias preconizadas para caracterização de cimento, a saber: i. Distribuição granulométrica do material depois de passado na peneira de 0,6 mm, determinada por difração a laser conforme a norma ISO 13320 (ISO, 2020); ii. Finura por peneiramento, conforme a norma técnica NBR 11579 (ABNT, 2013); iii. Superfície específica, conforme a norma técnica NBR 16372 (ABNT, 2015); iv. Massa específica, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017c). O índice de finura por peneiramento da amostra de EAEP moída foi de 24,88%, considerado alto para materiais cimentícios no Brasil (Lopes et al., 2021). Em relação à massa específica dos sólidos o valor obtido foi de 3,7 g/cm<sup>3</sup>. A superfície específica pelo método de Blaine foi de 0,20 m<sup>2</sup>/g, valor próximo ao requerido para cimento Portland, o 55 qual deve ser superior a 0,24 m<sup>2</sup>/g (Diniz et al., 2017). A curva granulométrica da amostra de EAEP moída e da amostra de solo argiloso (S1) é apresentada na Figura 1.

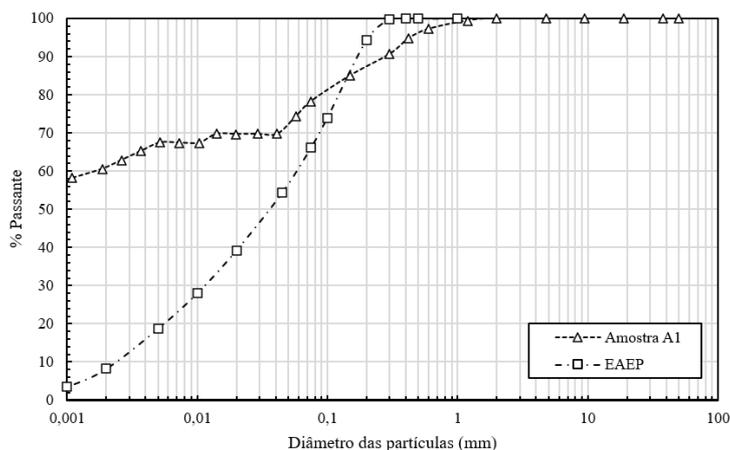


Figura 1 – Curva granulométrica da amostra de EAEP moída e da amostra de solo S1.

## 2.2 Métodos

A fim de determinar o comportamento sob a ótica da deformação permanente foram confeccionados nove corpos de prova para cada mistura apresentada na Tabela 2. Os corpos de prova foram confeccionados em

moldes cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm e submetidos a cura selada em filme PVC em câmara úmida por 28 dias e 56 dias. Posteriormente, foram realizados ensaios de compactação, visando a determinação dos parâmetros ótimos de compactação, na energia Proctor Normal, sem reuso de material e com secagem prévia, conforme a NBR 7182 (ABNT, 2020).

Tabela 2 – Misturas de solo argiloso-EAEP

| Misturas        | S1 natural ot | S1E ot/28 | S1E ot/56 |
|-----------------|---------------|-----------|-----------|
| Teor de umidade | ótimo         | ótimo     | ótimo     |
| Tempo de cura   | 0 dias        | 28 dias   | 56 dias   |

A avaliação da deformação permanente nos corpos de prova das amostras de solo no seu estado natural e nas misturas solo-EAEP foi conduzida de acordo com as diretrizes da norma técnica IE 179 (DNIT, 2018). O teste foi conduzido utilizando um equipamento de compressão triaxial de cargas repetidas, onde nove corpos de prova foram submetidos a 10.000 ciclos de carga. Na Tabela 3, são apresentados os estados de tensões utilizados em cada um dos nove corpos de prova para cada condição analisada neste estudo. Os ciclos de carga foram aplicados a uma frequência de 2 Hz, com 0,1 segundo de carregamento seguido por 0,4 segundo de repouso. O ensaio é realizado na condição drenada e as deformações obtidas são as deformações axiais dos corpos de prova.

Tabela 3 - Tensões atuantes nos corpos de prova.

| Corpo de prova | Tensão Confinante ( $\sigma_3$ ) x Tensão Desvio ( $\sigma_d$ ) (kPa) | Razão de tensões $\sigma_1/\sigma_3$ |
|----------------|---|--------------------------------------|
| CP1            | 40 x 40   | 2                                    |
| CP2            | 40 x 80   | 3                                    |
| CP3            | 40 x 120  | 4                                    |
| CP4            | 80 x 80   | 2                                    |
| CP5            | 80 x 160  | 3                                    |
| CP6            | 80 x 240  | 4                                    |
| CP7            | 120 x 120   | 2                                    |
| CP8            | 120 x 240   | 3                                    |
| CP9            | 120 x 360   | 4                                    |

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta os resultados de deformação permanente da amostra de solo S1 em sua condição natural e teor de umidade ótimo, em mm, em função do número de aplicações de carga.

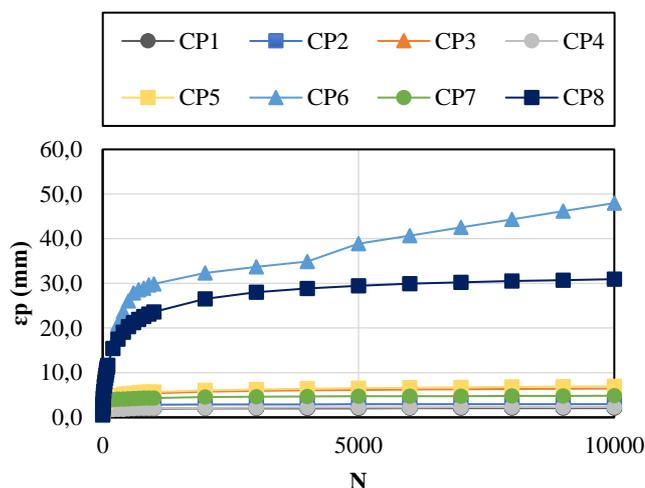


Figura 2 - Deformação permanente da amostra de solo S1 em sua condição natural e teor de umidade ótimo.

De acordo com a Figura 2 observou-se que a amostra de solo S1, em sua condição natural, apresentou valores de deformação permanente elevados; destacam-se os corpos de prova CP6 e CP8, cujos valores de  $\epsilon_p$  ultrapassaram o valor de 30 mm (correspondente a 30% de deformação axial). Para os corpos de prova cuja tensão confinante é de 40 kPa (CP1, CP2 e CP3), observou-se que mesmo com o aumento da tensão desvio os valores de deformação permanente encontraram-se abaixo de 10 mm. Para alguns corpos de prova, mesmo com o aumento da tensão confinante e da tensão de desvio, as deformações axiais permaneceram abaixo de 10 mm, como exemplificado pelo CP4, CP5 e CP7. No entanto, para os pares de tensão 80 kPa x 240 kPa e 120 kPa x 240 kPa, observou-se o comportamento de fluência plástica, em que foi possível notar um progressivo aumento de deformação permanente após múltiplas aplicações de carga mesmo este estando com baixa taxa de acréscimo de deformação permanente (CP6 e CP8). Além disso, verificou-se que a amostra de solo S1 não suporta o ensaio quando submetido aos pares de tensão correspondentes a 120 kPa de tensão confinante e 360 kPa de tensão desvio (CP9), rompendo-se ainda no procedimento inicial do ensaio.

Para a condição supracitada, o fenômeno do *Shakedown* foi observado para o CP1, CP2, CP3, CP4, CP5 e CP7. O CP6 e o CP8 revelaram o comportamento de fluência plástica.

A Figura 3 apresenta os resultados de deformação permanente das misturas S1E ot/28 e S1E ot/56, em mm, em função do número de aplicações de carga, e a Tabela 4 evidencia a comparação entre os valores de deformação permanente para as misturas supracitadas para N igual a 10000.

Tabela 4 - Comparação dos valores de deformação permanente entre as misturas analisadas.

| Corpo de prova | $\epsilon_p$ S1 ot (mm) | $\epsilon_p$ S1E ot/28 (mm) | $\epsilon_p$ S1E ot/56 (mm) |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| CP1            | 2,06                    | 1,46                        | 0,57                        |
| CP2            | 2,90                    | 1,87                        | 2,02                        |
| CP3            | 6,46                    | 2,80                        | 2,83                        |
| CP4            | 1,71                    | 1,09                        | 1,38                        |
| CP5            | 6,97                    | 12,52                       | 4,83                        |
| CP7            | 4,84                    | 1,19                        | 2,02                        |

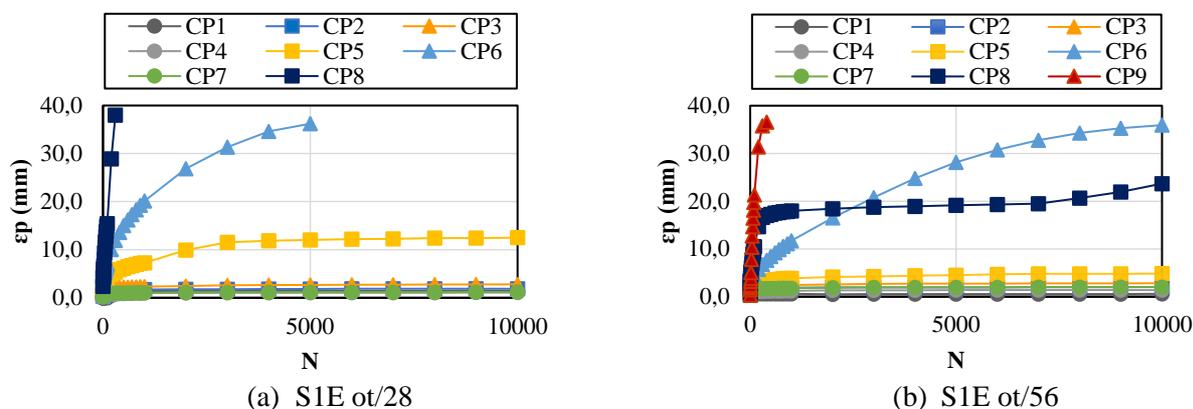


Figura 3 - Deformação permanente das misturas S1E ot/28 e S1E ot/56 em função do número de aplicação de cargas.

Em relação aos corpos de prova estabilizados com EAEP e ensaiados com tensão confinante de 40 kPa e tensões desvio de 40 kPa, 80 kPa e 120 kPa (CP1, CP2 e CP3), pôde-se observar que tanto para a cura de 28 dias quanto para a cura de 56 dias, o valor da deformação permanente diminuiu quando comparado ao solo na condição natural, esse fenômeno também foi observado para o par de tensão 120 kPa x 120 kPa (CP7). Tratando-se do CP5 (80 kPa x 160 kPa), no entanto, notou-se que a redução da  $\epsilon_p$  ocorreu somente para a cura de 56 dias.

Para a cura de 28 dias, os valores de  $\epsilon_p$  ultrapassaram 30 mm para o CP6 e CP8, evidenciando a condição de fluência plástica e colapso incremental, respectivamente, levando à interrupção do ensaio em um número de aplicações de carga iguais a 5000 e 300, ou seja, para ambos os casos não foi possível proceder à aplicação de carga para N igual a 10000. Em relação ao CP8 observou-se o rápido acúmulo de deformação permanente já no início do ensaio, atingindo o valor de 38,0mm antes de o ensaio ser paralisado. Ressalta-se que para este

tempo de cura também não foi possível proceder ao ensaio do CP9, submetido aos pares de tensão correspondentes a 120 kPa de tensão confinante e 360 kPa de tensão desvio.

Prolongando-se a cura para 56 dias, tornou-se possível proceder à finalização do ensaio do CP6 e CP8 (N=10000), ainda que os dois apresentassem a condição de fluência plástica. Pôde-se observar, inclusive, que embora o ensaio não tenha sido concluído (N = 400) por ter-se atingido o colapso incremental e, conseqüentemente, o limite máximo de  $\epsilon_p$  da máquina, foi possível ensaiar o CP9, cujos pares de tensão foram 120 x 360 kPa.

Analisando-se os valores encontrados é possível notar que a adição de EAEP, que é um material granular e sem coesão, altera de modo distinto os corpos de prova ensaiados. Para baixas tensões desvio, a diminuição da deformação permanente pode ser explicada pela alteração da granulometria da mistura solo-escória. O prolongamento no tempo de cura, no entanto, não mostrou-se significativo na redução da deformação permanente. Com relação às tensões desvio de maior módulo, 240 kPa ou 360 kPa (CP6, CP8 e CP9), a adição de EAEP e o processo de cura não mostraram-se eficientes para redução de  $\epsilon_p$ .

Esses resultados estão alinhados com a literatura técnica, pois uma maior razão de tensões torna a tensão desvio um fator de maior influência e nesse caso, a coesão dos materiais influencia bastante nos valores de rigidez e conseqüentemente, nos valores de deformações permanentes. Por outro lado, para menores razões de tensões, a tensão confinante se torna mais relevante, especialmente para materiais granulares, que aumentam sua rigidez com o aumento da tensão confinante (Medina e Motta, 2015).

Os resultados obtidos nesta pesquisa estão em consonância com os estudos realizados utilizando a escória de aciaria como material para estabilização (MOZEJKO; FRANCISCA, 2020; WANG *et al.*, 2020; YU *et al.*, 2021), ou seja, é notável que, mesmo em pequenas proporções, a adição de escória como agente estabilizador melhora as propriedades mecânicas do solo para baixos valores de razão de tensões, o que pode ser encontrado no subleito de pavimentos.

#### 4 CONCLUSÕES

A estabilização das amostras de solo argiloso analisadas com EAEP demonstrou-se eficiente na redução da deformação permanente sob baixas tensões, como era esperado. Isso ocorre porque a adição de escória promove reações pozolânicas. No entanto, no caso da escória, essas reações não são suficientemente fortes para produzir alterações expressivas sob tensões mais elevadas.

Em relação ao tempo de cura em câmara úmida, observou-se que o prolongamento de 28 para 56 dias não resultou em alterações significativas. As amostras de solo estabilizadas com EAEP além de apresentarem redução nos valores de deformação permanente demonstraram também um acomodamento plástico (*Shakedown*).

Conclui-se, portanto, que a estabilização de solos com EAEP, na proporção de 20% em massa, pode reduzir os valores de deformação permanente, além de ser uma alternativa técnica viável, haja vista a melhoria das propriedades mecânicas analisadas, possibilitando seu emprego em obras de pavimentação e, concomitantemente, contribuindo para o aproveitamento desses resíduos diminuindo os impactos que esses produtos podem causar ao meio ambiente.

#### AGRADECIMENTOS

À UFV por disponibilizar toda estrutura necessária para a realização desse trabalho e aos colegas que colaboram com as atividades de laboratório.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11579. Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº200). Rio de Janeiro, 2013, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16372. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015, 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16605. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017c, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6457. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a, 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6458. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017b, 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6459. Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017a, 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7180. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016b, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7181. Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2018, 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7182. Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2020, 9p.

CNT, Confederação nacional do transporte. Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas. Brasília, 2022. Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – PRO 199. Redução de amostra de campo de agregado para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 1996b, 5p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT – IE 179. Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio. Rio de Janeiro, 2018, 20p.

DINIZ, D. H.; CARVALHO, J. M. F. d.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. Blast Oxygen Furnace Slag as Chemical Soil Stabilizer for Use in Roads. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29, n. 9, p. 04017118, 2017.

HUANG, Y. H. Pavement analysis and design. 2004. 0136552757.

LINDH, P.; LEMENKOVA, P. Laboratory Experiments on Soil Stabilization to Enhance Strength Parameters for Road Pavement. *Transport and Telecommunication Journal*, 24, n. 1, p. 73-82, 2023.

LOPES, E. C.; DA SILVA, T. O.; PITANGA, H. N.; PEDROTI, L. G. et al. Application of electric arc furnace slag for stabilisation of different tropical soils. *International Journal of Pavement Engineering*, p. 1-12, 2021.

MOZEJKO, C. A.; FRANCISCA, F. M. Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag. 239, p. 117901, 2020/04/10/ 2020.

RODRIGUES, K. H. d. P. Utilização de Resíduos Industriais na Estabilização de Solos Tropicais para Aplicação em Pavimentação. Orientador: SILVA, T. O. d. 2022. 231 f. (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa.

SILVA, M. F. d.; RIBEIRO, M. M. P.; FURLAN, A. P.; FABBRI, G. T. P. Effect of compaction water content and stress ratio on permanent deformation of a subgrade lateritic soil. *Transportation Geotechnics*, 26, p. 100443, 2021/01/01/ 2021.

TERRONES-SAETA, J. M.; SUÁREZ-MACÍAS, J.; IGLESIAS-GODINO, F. J.; CORPAS-IGLESIAS, F. A. Development of High Resistance Hot Mix Asphalt with Electric Arc Furnace Slag, Ladle Furnace Slag, and Cellulose Fibers from the Papermaking Industry. *Applied Sciences*, 11, n. 1, 2021.

WANG, K.; ZHUANG, Y. Characterizing the permanent deformation Response-Behavior of subgrade material under cyclic loading based on the shakedown theory. *Construction and Building Materials*, 311, p. 125325, 2021/12/13/ 2021.

WANG, S.; LI, X.; REN, K.; LIU, C. Experimental Research on Steel slag Stabilized Soil and its Application in Subgrade Engineering. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, n. 5, p. 4603-4615, 2020/10/01 2020.  
WEI, X.; LIU, H.; KU, T. Microscale analysis to characterize effects of water content on the strength of cement-stabilized sand-clay mixtures. *Acta Geotechnica*, 15, n. 10, p. 2905-2923, 2020/10/01 2020.

YU, C.; CUI, C.; WANG, Y.; ZHAO, J. et al. Strength performance and microstructural evolution of carbonated steel slag stabilized soils in the laboratory scale. *Engineering Geology*, 295, p.

WANG, S.; LI, X.; REN, K.; LIU, C. Experimental Research on Steel slag Stabilized Soil and its Application in Subgrade Engineering. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, n. 5, p. 4603-4615, 2020/10/01 2020.